

Análisis del comportamiento de tableros de carreteras de luces cortas ejecutados con placa alveolar pretensada

Valentín Moreno Padilla¹, Luís Albajar Molera², Carlos Zanuy Sánchez²

¹*ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, Spain. E-mail address: vmorenopadilla @ yahoo.es*

²*Department of Continuum Mechanics and Structures ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, Spain. E-mail addresses: {czs, lalbajar} @ caminos.upm.es*

Resumen

El comportamiento de la placa alveolar se conoce de una manera muy precisa para un determinado ámbito de aplicación, los forjados. Las similitudes entre los forjados y los tableros de obras de paso de luces cortas son evidentes pero los métodos tradicionales utilizados para el cálculo de estos últimos no aportan suficiente precisión. Se propone un nuevo método de modelización híbrido que permite cuantificar de forma más realista el mecanismo resistente de los tableros demostrando la buena correlación con el comportamiento observado en la realidad.

Palabras clave

Puentes, placa alveolar, juntas longitudinales, torsión.

1. Introducción

La aplicación de placas alveolares pretensadas en ciertos ámbitos de la obra pública, a pesar de su aplicación limitada, es una práctica que presenta una creciente demanda debido a la posibilidad de aprovechar las ventajas del sistema. Dinteles de pasos inferiores, tableros de obras de paso de luces cortas, elementos de contención de tierras o incluso elementos transversales utilizados a modo de prelosas en tableros de puentes de luces medias y grandes son sólo algunos de los ejemplos que muestran la versatilidad del sistema para adaptarse a diferentes esquemas de sollicitación.

Tradicionalmente se ha supuesto que el comportamiento de este tipo de tableros es inadecuado para hacer frente a sobrecargas móviles de tráfico por dos motivos fundamentalmente. Las placas alveolares no tienen apenas capacidad resistente a torsión y, la junta existente entre capa de reparto y placas alveolares es incapaz de transmitir las tensiones rasantes porque no se puede colocar armadura de cosido entre ambos elementos.

A pesar de las posibles causas de fallo citadas anteriormente, el comportamiento en servicio observado en este tipo de tableros es más que satisfactorio.

La explicación de la aparente contradicción entre las predicciones teóricas y las observaciones reales puede obedecer a dos razones fundamentales. Por una parte, técnicas de modelización incapaces de representar los elementos y variables de gobierno de este tipo de tableros pueden conducir a la obtención de esfuerzos distorsionados que no se corresponden con la realidad del mecanismo resistente. Por otra, la intensidad de tráfico pesado que en general soporta este tipo de tableros no es muy elevada porque la ubicación de los mismos suelen ser entornos alejados de vías principales de comunicación tales como zonas rurales o carreteras de montaña. Esto hace pensar que la magnitud de los esfuerzos solicitantes en servicio no alcanza el umbral de diseño prescrito en la normativa. Aún así, no parece razonable establecer la hipótesis de que estas estructuras funcionan por la aleatoria y aparentemente favorable casuística de restricción de tráfico a que están sometidas.

La modelización tradicional de este tipo de estructuras se ha basado en el método del emparillado plano. Tanto las placas alveolares como la capa de reparto se definen mediante elementos de tipo barra y las juntas entre placas se representan mediante rótulas, o mejor dicho, cuasi-rótulas que transmiten los cortantes verticales y momentos flectores muy bajos.

Como alternativa al método del emparillado se propone un método de modelización híbrido que contiene elementos finitos de tipo lámina para representar la capa de reparto y elementos finitos de tipo barra para representar las placas alveolares. Ambos elementos se conectan de forma rígida mediante la imposición de condiciones de compatibilidad. Las juntas longitudinales entre placas se representan como elementos de contacto no lineales.

Se analiza un tablero tipo mediante este método y se pone de manifiesto que los esfuerzos de torsión sobre las placas quedan prácticamente reducidos a cero gracias al excelente trabajo de la placa de reparto y a la consideración en el modelo del efecto del espesor de las placas alveolares. Se corrobora por tanto el buen comportamiento observado en la práctica.

II. Motivación y objetivos

La hipótesis fundamental de trabajo es demostrar la adecuada aptitud del sistema de placas alveolares pretensadas para conformar tableros de obras de paso de carreteras de luces cortas sometidos a cargas de tráfico.

Entender el mecanismo resistente de este tipo de tableros es fundamental para poder explicar el comportamiento observado en la práctica. Es imprescindible conocer la morfología básica y las disposiciones constructivas habituales para establecer las principales variables de gobierno. Igualmente es necesario establecer esquemas de modelización adecuados basados en los últimos avances del conocimiento para obtener solicitaciones fiables.

III. Morfología básica de los tableros de placa alveolar

Los tableros están formados por dos elementos fundamentales. Placa alveolar de hormigón pretensado y capa de reparto de hormigón armado.

Los elementos de la superestructura no difieren en general del resto de tipos de tableros. Pretiles, capa de rodadura, impostas, iluminación y drenaje pueden asimilarse a los habitualmente empleados en otros tipos de obras de paso.

Las secciones tipo (Fig 1) suelen tener del orden de 8 a 10 m de anchura para poder albergar cómodamente dos carriles con anchuras variables entre 2 y 3 m habitualmente y una o dos aceras de aproximadamente 1 m de anchura además del espacio para los elementos de contención de vehículos y peatones.

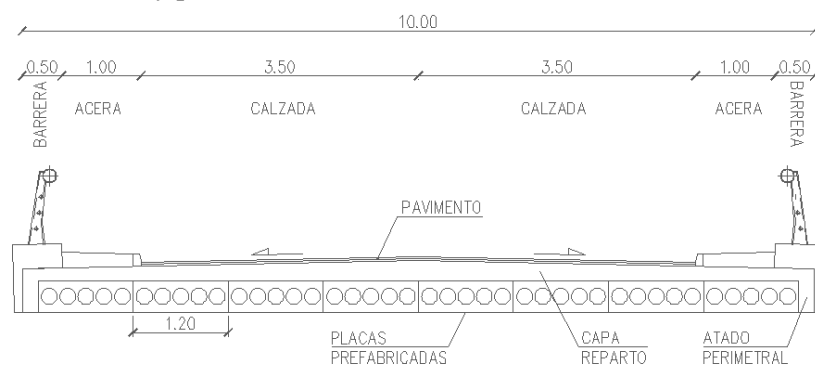


Figura 1. Sección tipo

Los estribos del puente pueden ser ejecutados in situ ó prefabricados. En este último caso se pueden emplear igualmente placas alveolares pretensadas en posición vertical para contención de tierras. También es común el empleo de escamas para formar macizos de suelo reforzado. Las disposiciones constructivas habituales (Fig 2) suelen ser tramos isostáticos únicos con luces aproximadas de hasta 15 m. Los cantos habituales de las placas suele estar entre 35 y 50 cm y los espesores de la capa de reparto varían entre 10 y 20 cm[1] . No se puede hablar en principio de relaciones canto/luz como tales puesto que en muchas ocasiones se emplea el mismo canto de placa para un rango de luces determinado. Estas dimensiones suelen ser suficientes para salvar pequeños cauces, caminos o incluso carreteras secundarias con cunetas y arcenes.

En el caso de disponer varios vanos (Fig 2), las pilas suelen adoptar la configuración de pórticos o tabiques para recibir a las placas mediante apoyos continuos evitando de esta forma concentraciones de tensiones. Los apoyos se materializan mediante bandas elastoméricas corridas sin zunchar. También se pueden disponer una serie de apoyos discretos bajo cada placa.



Figura 2. Disposiciones constructivas habituales

La técnica empleada en el caso de la ejecución de tableros de obras de paso de carreteras es herencia directa del ámbito de los forjados de edificios de habitación. Sobre los estribos previamente contruidos se disponen una serie de placas yuxtapuestas longitudinalmente según el eje de la obra. Sobre las placas se coloca una capa de reparto de hormigón vertido in situ que, a priori, tiene una doble misión. Por una parte se encarga de transmitir transversalmente entre placas los esfuerzos provocados por acciones verticales consiguiendo de esta forma un diafragma de reparto horizontal como si de un tablero de vigas se tratase; por otra parte actúa como diafragma horizontal frente a acciones horizontales garantizando de esta forma el trabajo uniforme del conjunto.

IV. Modelización de forjados de placa alveolar pretensada

En la actualidad existen básicamente tres posibilidades para la determinación de los esfuerzos sobre un forjado.

IV.1 Modelos basados en ábacos

Es el sistema tradicional prescrito por EHE-08 [2] y EN 1168 CEN/Tc229 [3]. Se basa en unos gráficos que permiten obtener la distribución transversal de cargas de un forjado, sin capa de reparto, formado por cinco placas alveolares cuyo trabajo se supone conjunto mediante la teoría de la elasticidad. Según esta teoría, para poder considerar el trabajo conjunto de las placas, es necesario limitar los desplazamientos laterales.

Las placas se modelizan como elementos isótropos o anisótropos y las juntas longitudinales se representan mediante rótulas a modo de bisagras permitiendo el libre giro transversal de una placa respecto a otra. De esta forma se transmiten los cortantes de una placa a otra pero no los momentos flectores transversales.

IV.2 Modelos de elementos finitos tipo losa

Basándose en la teoría de la elasticidad, las instrucciones [2] y [3] permiten modelizar las placas alveolares como losas isótropas o anisótropas. En ningún caso se hace referencia a la representación de la capa de reparto. Tan sólo se establecen recomendaciones sobre las condiciones geométricas que tiene que cumplir esta.

Para la modelización se suelen emplear elementos finitos de tipo lámina cuya formulación permite tener en cuenta tanto los esfuerzos perpendiculares al plano medio del elemento como los contenidos en el mismo. También permiten representar el comportamiento ortótropo de las placas.

IV.3 Modelos de elementos finitos tipo barra

El elemento de tipo barra es el más manejable y accesible por todos los programas comerciales. Una placa alveolar puede ser representada perfectamente mediante una serie de barras longitudinales dispuestas según la directriz de la misma. Un forjado puede ser representado por una serie de barras yuxtapuestas separadas la distancia entre ejes de placas.

Las placas alveolares están en la práctica conectadas entre sí mediante juntas longitudinales que se hormigonan in situ. Normalmente las juntas están fisuradas y tradicionalmente se asume que actúan como rótulas. Como consecuencia, la distribución de las cargas aplicadas sobre las placas introduce momentos torsores sobre las mismas que a su vez introducen fuerzas de contacto horizontales sobre las juntas longitudinales (Fig 3) [4].

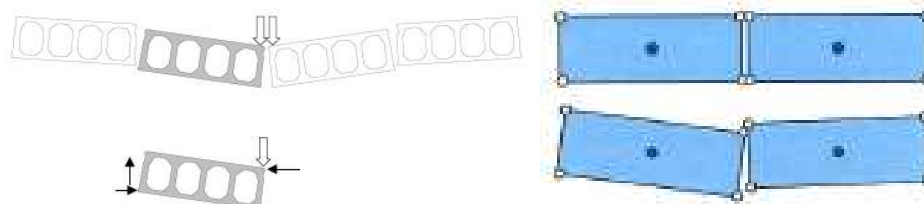


Figura 3. Mecanismo de distribución transversal. Cortesía de Lundgren

Las fuerzas de contacto horizontales provocan a su vez un momento torsor de sentido contrario al que provocan las acciones exteriores precisamente porque las juntas entre placas están hormigonadas. Este efecto (efecto del espesor) tiene una gran influencia sobre el comportamiento de los forjados y es de vital importancia su inclusión en los modelos de cálculo. Para ello, Lundgren [5] define la sección transversal de cada placa mediante un único elemento de tipo barra alineada con la directriz. Además, una serie de nodos llamados nodos esclavos se posicionan en las esquinas de la sección transversal (Fig 3). Estos nodos se unen a los nodos de la directriz de forma que, de cara a las deformaciones y giros de la sección transversal, se asumen dos hipótesis básicas de funcionamiento; Navier-Bernoulli (planeidad de secciones) y Saint Venant (torsión sin distorsión).

IV.4 Correlación entre los distintos tipos de modelos

Para establecer la precisión del modelo de Lundgren se han hecho estudios comparativos [5]. Se parte de un forjado formado por cinco placas alveolares sometido a una carga puntual de 100 kN centrada en el vano y en el ancho. Las luces estudiadas son 4, 7 y 14m. Dos modelos fueron analizados.

El primero de ellos es un modelo con elementos tipo barra basado en la discretización de Lundgren. A cada barra se le asigna las propiedades de una de una placa de 400 mm de canto y 1200 mm de ancho. Las juntas entre nodos contiguos se modelizaron con elementos de contacto no lineales que permitían compresiones y muy pocas tracciones.

Para el segundo modelo se emplearon elementos finitos de tipo lámina cuadriláteros de cuatro nodos con formulación de interpolación lineal. El espesor de los elementos fue de 354 mm para que la inercia principal a flexión coincidiera con la de la placa. La rigidez a flexión transversal se consideró la misma que la longitudinal. La rigidez a torsión se tomó igual a la del elemento finito sin minorar. En este segundo modelo las juntas se modelizaron como rótulas. Los resultados de ambos modelos fueron coincidentes. A su vez se contrastaron con las previsiones de los ábacos de reparto transversal propuestos por FIP[6] basados en la teoría de la elasticidad y las correspondencias de resultados entre los modelos y los ábacos resultaron excelentes.

V. Modelización tradicional de tableros de placa alveolar pretensada

A pesar de los medios disponibles en la actualidad y de la posibilidad de representar efectos tales como el espesor de las placas dentro de un forjado o tablero, el método del emparrillado[7] sigue estando en plena vigencia. Cada una de las placas alveolares se representa mediante dos vigas longitudinales del emparrillado representando cada una de ellas la mitad de la sección transversal más la parte tributaria de la capa de reparto[1]. A estas barras se les asignan las características de áreas e inercias a flexión y torsión correspondientes. Las barras transversales representan a la capa de reparto y suele haber dos tipos.

Barras transversales interiores situadas entre las dos barras longitudinales de cada placa que representan transversalmente a la placa más la capa de reparto y barras transversales exteriores que representan la junta entre placas.

A las barras transversales interiores se les asignan las áreas e inercias transversales del conjunto mientras que a las barras transversales exteriores sólo se les asignan las propiedades de la capa de reparto. De esta forma se recoge en cierta manera el efecto del debilitamiento que supone la junta entre placas y, aunque no llega a ser una rótula tal y como prescriben las normativas, es en cierto modo un punto débil para la flexión y el cortante.

De este tipo de modelos se obtienen de forma directa los esfuerzos principales de flexión y cortante tanto longitudinales como transversales, esfuerzos rasantes y cortantes en juntas. Los esfuerzos de torsión hay que procesarlos y trasladarlos al centro de gravedad de la sección compuesta.

Respecto a estos últimos hay que decir que el hecho de no poder representar el efecto del espesor de la placa[5] se traduce en la sobreestimación de los mismos. Esta sobreestimación puede provocar que la sollicitación a torsión de la placa sea superior, al menos teóricamente, a la baja capacidad resistente de la misma. Este hecho ha sido el que tradicionalmente ha provocado el rechazo respecto al empleo de placas alveolares pretensadas en tableros de obras de paso. Se plantea por tanto la necesidad de incorporar los últimos avances en el campo de la modelización para poder establecer magnitudes de las sollicitaciones más fiables.

VI. Propuesta de modelización híbrida

Vistas las posibles carencias del método del emparrillado plano para representar el trabajo real de torsión de las placas, se plantea un nuevo método de modelización para este tipo de tableros basado en las siguientes premisas.

- 1) Las placas alveolares se representan mediante elementos finitos de tipo barra.
- 2) Las juntas longitudinales entre placas se representan mediante elementos de contacto no lineales.
- 3) La capa de reparto se representa mediante elementos finitos de tipo lámina.

Las especiales características del modelo exigen de una conexión rígida entre los elementos descritos de forma que se cumplan las hipótesis de Navier-Bernoulli y Saint-Venant.

Como aplicación práctica se ha modelizado un tablero (Fig 4) con las siguientes características.

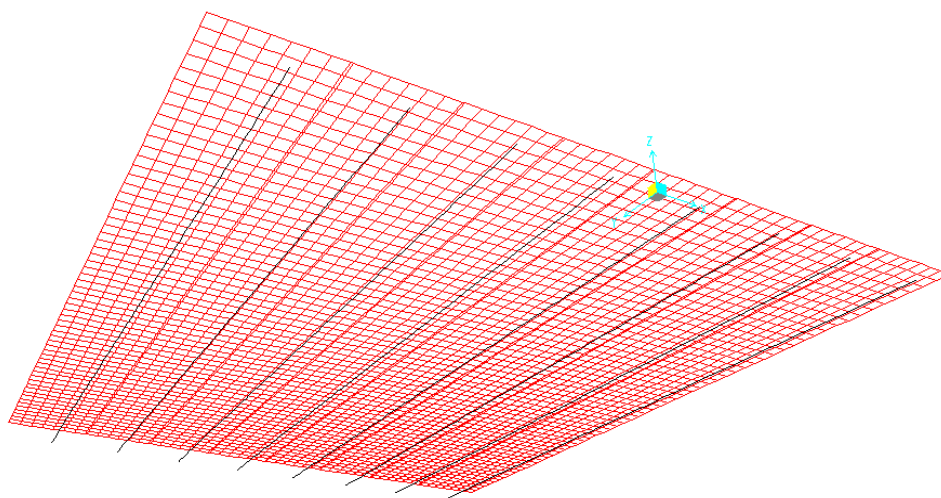


Figura 4. Vista general inferior del modelo

El tablero está compuesto por ocho placas alveolares de 120 cm de ancho y 40 cm de canto. La luz es de 12 m. Las características mecánicas de las placas se muestran en la tabla 1. El eje X es horizontal y el eje Y es vertical ambos pasando por el centro de gravedad de la sección.

Canto de placa (mm)	400
f_{ck} (Mpa)	40
$f_{ct,k}$ (Mpa)	2,45
E (Mpa)	30891
A (m ²)	0,2108
I_x (m ⁴)	$4,43 \cdot 10^{-3}$
I_y (m ⁴)	$2,80 \cdot 10^{-2}$
I_t (m ⁴)	$9,03 \cdot 10^{-3}$
A_p (mm ²)	976.5

Tabla 1. Características de las placas

Las placas se disponen simplemente apoyadas en los extremos de forma que un extremo tiene impedidos los tres desplazamientos y dos de los giros permitiendo el giro principal de flexión

longitudinal. El extremo opuesto tiene las mismas coacciones pero además permite el desplazamiento longitudinal materializando de esta forma un apoyo móvil. La directriz de cada placa se discretiza mediante 60 barras de 20 cm de longitud. Asociados a cada nodo de la directriz se colocan cuatro nodos esclavos de forma que los cinco nodos cumplen simultáneamente dos condiciones de compatibilidad mencionadas.

Los elementos elegidos para la discretización de la directriz son barras de dos nodos que utilizan una formulación tridimensional de tipo viga-columna que incluye los efectos de flexión biaxial, torsión, deformación axial y deformaciones por cortante.

Las distancias entre nodos esclavos extremos de placas son de 3 cm para materializar el ancho de las juntas. Cada dos nodos están conectados por un elemento de conexión que permite desarrollar fuerzas de compresión perpendiculares al plano de la junta. No se permiten tracciones. En las direcciones vertical y longitudinal de la junta se permiten fuerzas tanto de compresión como de tracción.

Las rigideces de los elementos de conexión se muestran en la tabla 2.

Compresión junta (N/m ³)	3x10 ¹⁰
Tracción junta (N/m ³)	0
Cortante vertical junta (N/m ³)	1x10 ⁹
Cortante longitudinal junta (N/m ³)	1x10 ⁹

Tabla 2. Características de las juntas

La junta representa una no linealidad geométrica. Además, es necesario representar la apertura de la misma de forma que se puedan tener en cuenta los fenómenos de retracción del hormigón vertido in situ, la edad de las placas y el tamaño de la junta. El valor de apertura de junta elegido es de 0,5 mm puesto que representa el límite superior recomendado para que los mecanismos de fricción y acunamiento se puedan desarrollar[8] .

Las ecuaciones constitutivas de los elementos de contacto que representan las condiciones impuestas son:

$$1) F = k (d + \delta_{\text{apertura}}) \quad \text{si} \quad d + \delta_{\text{apertura}} < 0$$

$$2) F = 0 \quad \text{Resto de casos}$$

La capa de reparto se modeliza mediante elementos finitos de tipo lámina de cuatro nodos con formulación general de Kirchhoff. Las características se muestran en la tabla 3.

Espesor del elemento (mm)	200
Dimensiones (mm ²)	200 x 200
fck (Mpa)	25
E (Mpa)	27264

Tabla 3. Características de la capa de reparto

VII. Bases de cálculo

VII.1 Acciones

Las acciones empleadas en el modelo son:

Peso propio de placas (PP) = 5,27 kN/m.

Pretensado (P). Se ha introducido como una fuerza exterior de compresión de valor 976.5 kN y un momento negativo de valor -166 kNm en los extremos de las placas; no se han considerado pérdidas.

Peso propio de la capa de reparto (PPCRI) = 6 kN/m para las placas interiores y PPCRE = 9 kN/m para las placas exteriores debido al peso de los zunchos de atado.

Resto de carga permanente correspondiente a aceras (RCPA) = 5 kN/m².

Resto de carga permanente correspondiente a barreras (RCPB) = 10 kN/m/barrera.

Resto de carga permanente correspondiente a un espesor de pavimento de 5 cm (RCP) = 1,2 kN/m².

Sobrecarga de uso uniforme (SCU) = 4 kN/m² según IAP-98[9] .

Tren de cargas (CA) = 6 x 100 kN según IAP-98[9] .

Los valores de cálculo de las acciones para ELU y ELS se han obtenido de EHE-08 [2] .

VII.2 Comportamiento de los materiales

Los materiales se han caracterizado mediante su módulo de deformación longitudinal y transversal. Las secciones empleadas en los cálculos son brutas y el comportamiento es elástico y lineal en todo momento. Este planteamiento es compatible con la filosofía de los estados límite para el cálculo de esfuerzos y la posterior comprobación en servicio o rotura. No se han considerado efectos reológicos ni térmicos.

VII.3 Proceso constructivo

La secuencia de fases ha sido:

Fase-1. Pretensado (P) + (PP). Sección simple.

Fase-2. Montaje de Superestructura (RCP). Sección compuesta.

Fase-3. Sobrecarga de uso (SCU). Sección compuesta.

Fase-4A. Carro en centro de vano excéntrico (CA_CV). Sección compuesta.

Fase-4B. Carro en apoyo excéntrico (CA_AP). Sección compuesta.

Por simplicidad sólo se muestran los gráficos (Fig 5) correspondientes a la hipótesis del carro CA. La numeración de las placas es 1 a 8 siendo la placa 1 la más alejada del carro (CA).

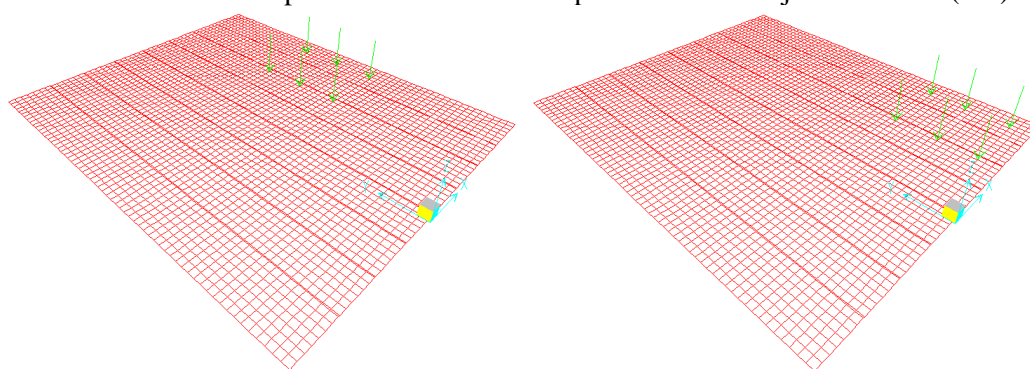


Figura 5. Posición de los carros (CA)

VIII. Resultados ELS

De entre todos los ELS, el de fisuración por tensiones normales es el más representativo para cuantificar los aspectos de durabilidad y deformacionales de cara a poder explicar el buen comportamiento observado en la práctica.

VIII.1 Fisuración por tensiones normales

El siguiente gráfico (Fig 6) muestra el incremento tensional de la armadura de pretensado por efecto de las acciones exteriores para la combinación frecuente. Los valores positivos indican tracciones. Puede comprobarse que el pretensado de las placas extremas está por debajo de 200 Mpa por lo que la abertura de fisura no supera los 0,2 mm[2] . Las placas interiores se encuentran en descompresión.

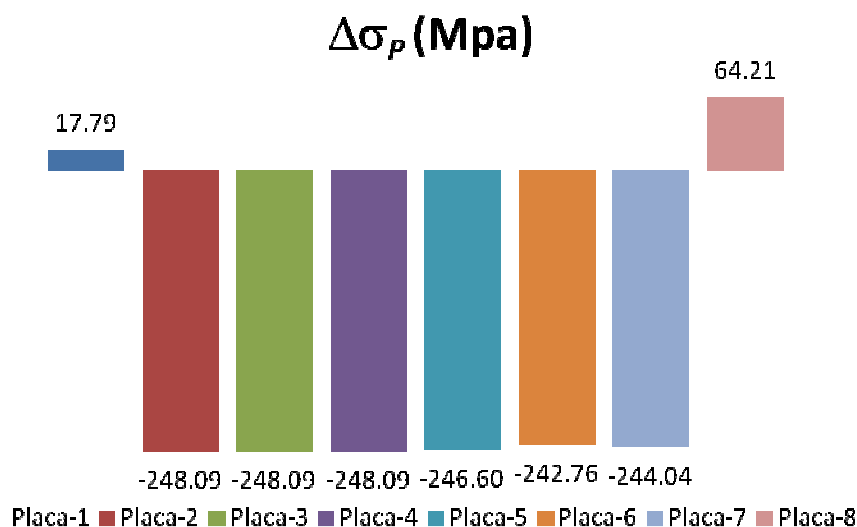


Figura 6. Incrementos tensionales en la armadura de pretensado

IX. Resultados ELU

Se analizan los esfuerzos que tradicionalmente han supuesto un impedimento para su aplicación. Cortante, torsión, cortante longitudinal en juntas y rasante entre la capa de reparto y las placas.

IX.1 Cortante

La comprobación del ELU de cortante se hace conforme al artículo 44 de EHE-08[2]. El gráfico adjunto (Fig 7) muestra la distribución de cortantes en las placas del modelo para la combinación de hipótesis correspondiente a la actuación de peso propio (PP), pretensado (P), resto de carga permanente (RCP), sobrecarga de uso extendida a todo el tablero (SCU) y carro excéntrico a un canto útil del apoyo (CA_AP). También se ha representado la capacidad del alma V_{u2} y la reducida por efecto del torsor V_{u2n} .

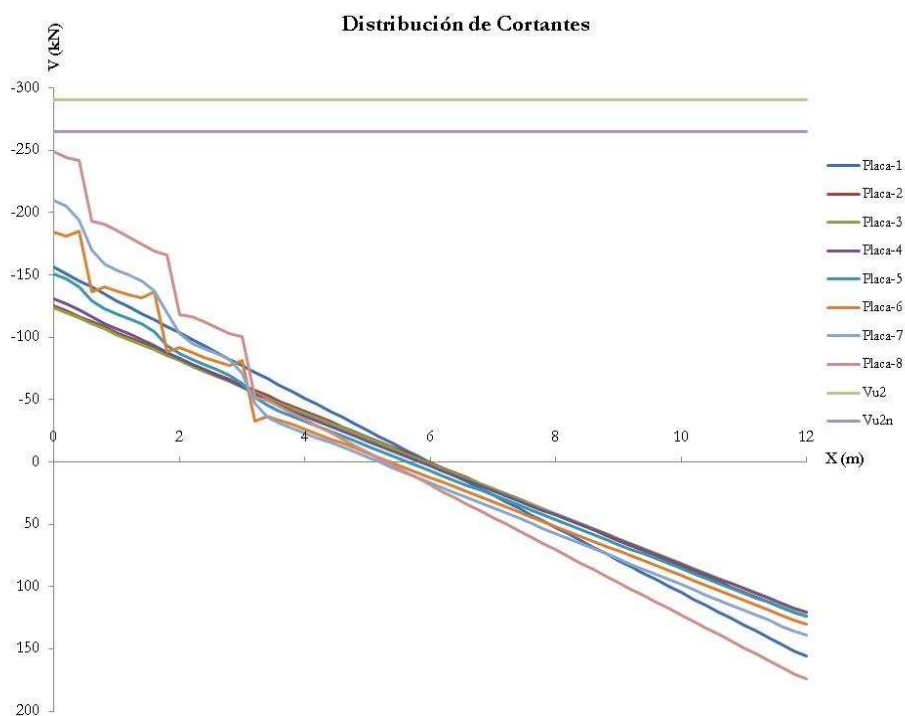


Figura 7. Distribución de cortantes en placas

En rigor, la capacidad Vu_2 mostrada no sería una línea recta sino curva en función de la zona (fisurada o no) donde se encuentre la sección en estudio; pero en este caso no se pretende evaluar la capacidad de cada sección a cortante sino comparar con un valor límite.

Las placas 6, 7 y 8 acusan fuertemente la presencia del carro mostrando tres saltos en la ley de variación del cortante coincidentes con la posición de las cargas. Puede verse cómo a partir de la placa 5 se empieza a notar el efecto del carro como consecuencia de haber introducido en el modelo los elementos de conexión entre placas (juntas longitudinales). La distribución de cortantes sobre los apoyos no es muy uniforme, a pesar de la influencia de la capa de reparto, debido a la presencia del carro en las proximidades.

IX.2 Torsión

El mecanismo resistente a torsión contenido en EHE-08 [2] (art. 45) responde a un esquema de bielas y tirantes basado en la obtención de una sección hueca equivalente. Precisa de tres elementos para su formación. Dos familias de armadura pasiva, cercos transversales y barras longitudinales, colocadas en el perímetro de la sección hueca equivalente para la materialización de los tirantes, y bielas de hormigón alojadas en las paredes de dicha sección.

Los elementos de una placa alveolar necesarios para la formación de la sección hueca equivalente son las tablas superior e inferior y las almas exteriores. Las bielas se pueden materializar fácilmente a través de las tablas superior e inferior así como de las almas exteriores. Los alambres o tendones de pretensado pueden hacer las funciones de tirantes longitudinales aunque incumplen una condición básica para la formación del mecanismo; no están distribuidos uniformemente sobre el perímetro de la sección. Los tirantes transversales no se pueden materializar por la imposibilidad de colocar cercos cerrados sobre el perímetro de la pieza durante el proceso de fabricación. Únicamente se puede confiar en la resistencia a tracción del hormigón para su formación pero esto limita fuertemente la capacidad resistente del mecanismo a torsión además de ser incongruente con las prescripciones de EHE-08[2].

El método de comprobación para el caso particular de placas alveolares pretensadas está basado en la obtención de los flujos tensionales que provocan los momentos torsores sobre las paredes de la sección hueca equivalente[2]. Para ello, es muy útil obtener la curva característica que relaciona momentos torsores con giros.

El siguiente gráfico (Fig 8) muestra la distribución de momentos torsores en las placas del modelo para la combinación de hipótesis correspondiente a la actuación de peso propio (PP), pretensado (P), resto de carga permanente (RCP), sobrecarga de uso extendida a todo el tablero (SCU) y carro excéntrico a un canto útil del apoyo (CA_AP). Con objeto de percibir con mayor precisión el efecto de la torsión sobre cada placa se ha prescindido de representar el valor límite del momento torsor de agotamiento para las placas ($M_t=80$ kNm).

El gráfico muestra cómo las placas más alejadas de la zona de influencia del carro (placas 1 y 2) apenas reciben el influjo del mismo mientras que las placas 5 y 6 son las más solicitadas. Una vez más se pone de manifiesto el efecto de la inclusión de las juntas longitudinales en el modelo mediante elementos de contacto. Se corrobora la hipótesis de Lundgren[5]. El efecto del espesor de las placas hace que los momentos torsores sobre las mismas se vean disminuidos notablemente por la aparición de fuerzas en el contacto entre placas de sentido contrario a las introducidas por las fuerzas exteriores.

Por otra parte, debido al trabajo de la capa de reparto, la magnitud de los esfuerzos torsores es muy reducida y las placas se encuentran por tanto muy lejos de su capacidad de agotamiento. Esta es la principal característica del funcionamiento de los tableros de placa alveolar pretensada. La capa de reparto realiza un excelente trabajo aliviando a las placas de torsiones innecesarias y poniendo de manifiesto, en analogía con los tableros de vigas, que un espesor adecuado de la misma permite afrontar el trabajo de reparto transversal sin necesidad de implicar a las placas. De esta forma se pueden aprovechar éstas para el desempeño fundamental del trabajo de flexión longitudinal.

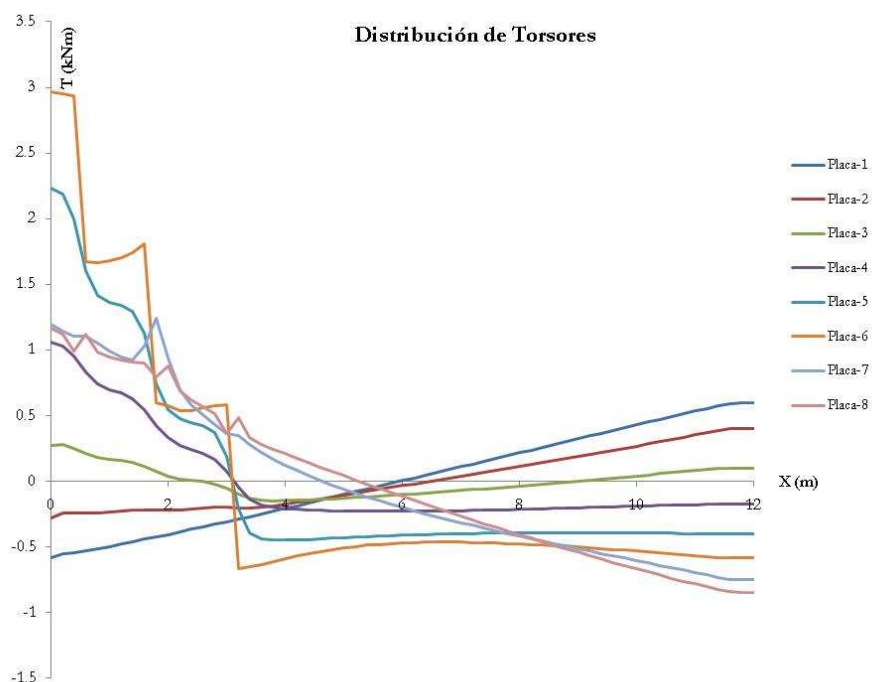


Figura 8. Distribución de torsores en placas

IX.3 Cortante en juntas longitudinales

La comprobación del cortante vertical en las juntas se lleva a cabo mediante la aplicación del artículo 44.2.3.6 de EHE-08[2]. Se tienen en cuenta dos secciones de control. La primera es la compuesta por capa de reparto y tablas superior e inferior de las placas que proporciona un

valor de $V_u = 92,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$. La otra sección es la compuesta únicamente por hormigón vertido in

situ. En este caso $V_u = 107,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$. Se toma el valor mínimo para la comprobación.

El gráfico (Fig 9) muestra la distribución de cortantes verticales en las juntas longitudinales entre placas para la combinación de hipótesis correspondiente a la actuación de peso propio (PP), pretensado (P), resto de carga permanente (RCP), sobrecarga de uso extendida a todo el tablero (SCU) y carro excéntrico en centro de vano (CA_CV).

En la zona de influencia de las cargas puntuales del carro se acusa un incremento de la magnitud del cortante pero no se llega a rebasar la capacidad de la junta en ningún caso.

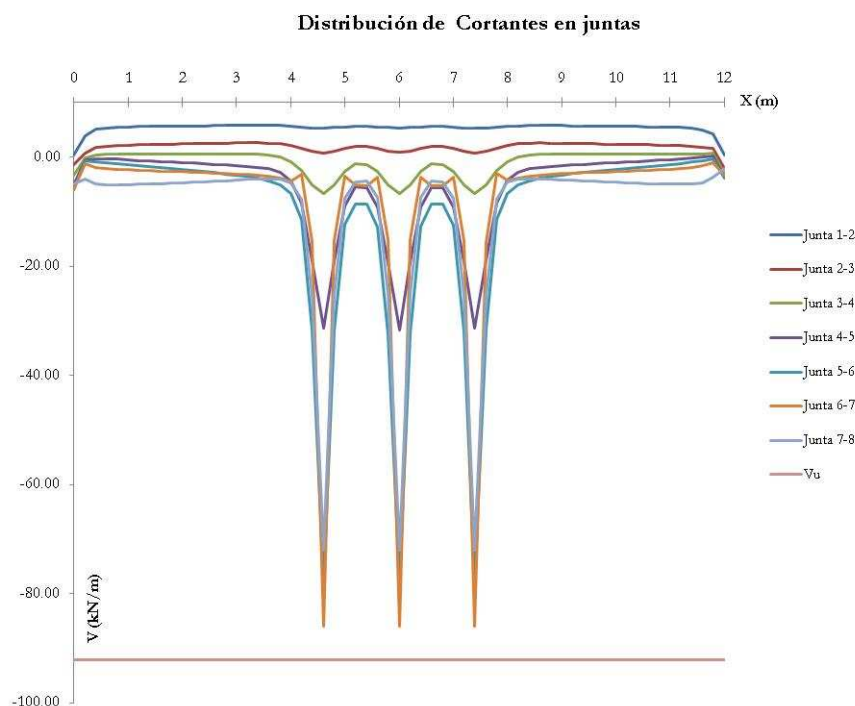


Figura 9. Distribución de cortantes en juntas longitudinales

IX.4 Rasante entre hormigones

La comprobación de las tensiones rasantes en la junta existente entre placas alveolares y capa de reparto se hace conforme al artículo 47.2.1 de EHE-08 [2] y está basada en la suposición de dos hipótesis. No existe armadura de cosido y la superficie de contacto puede considerarse como de alta rugosidad. Adicionalmente el articulado establece la limitación de reducir en un 50% el factor de cohesión entre hormigones cuando las solicitaciones sean de tipo dinámico o de fatiga. Esta cuestión es muy discutible en este tipo de tableros pero aún así se ha tenido en cuenta por ser esta comprobación especialmente sensible para explicar el buen funcionamiento observado en los puentes construidos.

En (Fig 10) se representa la distribución de tensiones rasantes de cálculo en cada punto de la directriz de la placa 7 situada bajo el carro para la combinación de hipótesis correspondiente a la actuación de peso propio (PP), pretensado (P), resto de carga permanente (RCP), sobrecarga de uso extendida a todo el tablero (SCU) y carro excéntrico en centro de vano (CA_CV). También se representa la tensión rasante última soportada por la junta.

A la vista de los resultados puede decirse que todas las secciones se hallan dentro del dominio de seguridad incluso las zonas próximas a los extremos libres.

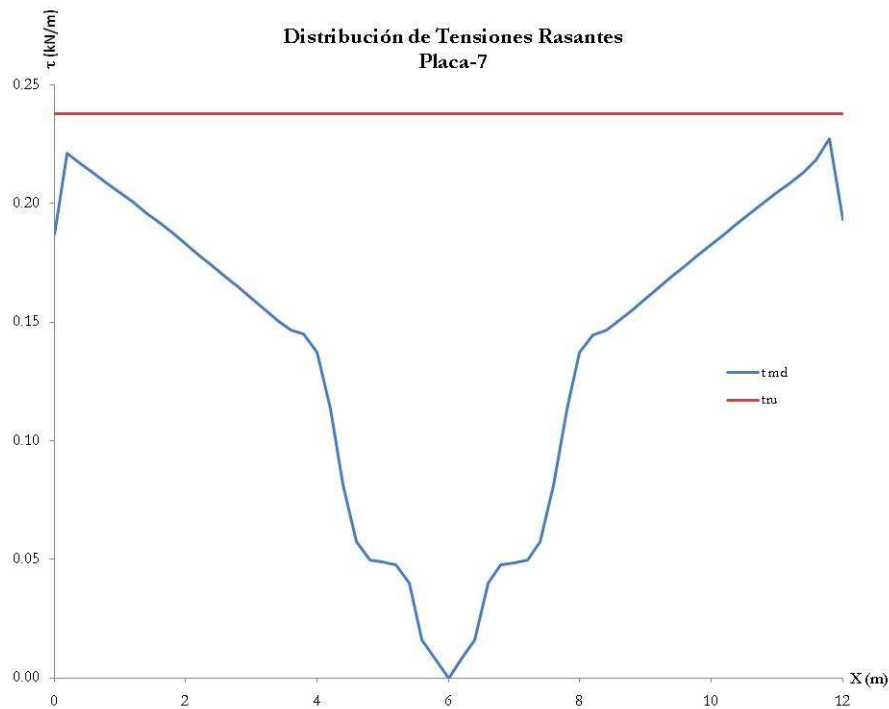


Figura 10. Distribución de tensiones rasantes en placa 7

X. Conclusiones

- 1) Existen tres grupos de herramientas para modelización de forjados de placa alveolar sin capa de reparto. Ábacos basados en la teoría del reparto transversal, modelos de elementos finitos de tipo barra y modelos de elementos finitos de tipo lámina. Cualquiera de los tres sistemas presenta suficiente precisión para la representación del mecanismo resistente y además existe muy buena correlación entre ellos.
- 2) El modelo de barras (Modelo de Lundgren) permite introducir el efecto del espesor de las placas con la consecuente repercusión sobre la minimización de los esfuerzos de torsión sobre las placas. También permite representar el comportamiento real de las juntas longitudinales entre placas.
- 3) El método tradicionalmente usado para la modelización de tableros es el del emparrillado plano aunque presenta ciertas limitaciones para la caracterización de la torsión y las juntas longitudinales entre placas.
- 4) Se propone un tipo de modelización denominado híbrido formado por elementos de tipo barra para la representación de las barras y elementos de tipo lámina para la representación de la capa de reparto. Ambos elementos se conectan rígidamente. Las juntas longitudinales se modelizan mediante elementos no lineales de contacto. Dicho modelo se aplica a un tablero de 12m de luz formado por 8 placas de 40cm de canto sobre las que se coloca una capa de reparto de 20cm.
- 5) La predicción obtenida en la comprobación del ELS de fisuración por tensiones normales se corresponde con las observaciones realizadas sobre puentes construidos.
- 6) Se comprueban determinados ELU que tradicionalmente han puesto en tela de juicio la validez de las placas alveolares para su empleo en tableros (cortante, torsión, cortante en juntas longitudinales y rasante entre hormigones). Todas las comprobaciones resultan satisfactorias.
- 7) En el caso particular de la comprobación de torsión, se pone claramente de manifiesto que los esfuerzos sobre las placas prácticamente desaparecen gracias a dos factores. La inclusión en el modelo de cálculo de los efectos del espesor de las placas y la capa de reparto. Esto explica claramente por qué las placas funcionan perfectamente dentro de este tipo de tableros.

Bibliografía

- [1] Prefabricados J. Cirera Arcos S.A; Colección de tableros de puentes (1990).
- [2] Ministerio de Fomento; EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural (2008).
- [3] EN1168, CEN/Tc229, European Standard EN 1168:2005; Precast concrete products – hollow core slabs (2005).
- [4] CHALMERS, Civil and Environmental Engineering; Shear and torsion interaction of hollow core slabs. HOLCOTORS, Technical Report 3, Rev.1 (2004)
- [5] K. Lundgren; H. Broo; B. Engström. Analyses of hollow core floors subjected to shear and torsion. *Structural Concrete* (2004), 5, Nº 4, 161-172.
- [6] Fédération Internationale de la Précontrainte; Precast prestressed hollow core floors. Thomas Telford (1998).
- [7] Javier Manterola; Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción (2006).
- [8] Elliot, K.S; Davies, G.; Bensalem, K. Precast Floor Slabs Diaphragms Without Structural Screeds, *Concrete 200 – Economic and Durable Construction Through Excellence* (1993) 617-632.
- [9] Ministerio de Fomento; IAP Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (1998).